

Diseño y construcción de un biodigestor en la Universidad Don Bosco

Moisés Guerra¹

Resumen:

El presente artículo tiene como finalidad describir la investigación llevada a cabo a través de las escuelas de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la construcción de un biodigestor y la experiencia de sus estudiantes desde un aspecto técnico e ingenieril en el que demostraron sus habilidades y destrezas como futuros ingenieros. Sus resultados son abordados a través de este medio como una forma de divulgación en espera de críticas constructivas que conlleven a la formulación de nuevos proyectos abordados desde un punto de mejora continua.

Palabras claves: Energía, Biomasa, Biodigestor, Diseño.

1. Introducción

Mucho se ha hablado sobre la problemática energética a nivel mundial, sobre todo con el alza en los precios del combustible y específicamente en el entorno de los países en vías de desarrollo económico. Esto hace que el modelo energético en cada región se vuelva importante, así como también el tipo de energía por el que se opta, la forma de producirla, el cómo, el dónde, para qué y para quién, ya que esto determina el tipo de sociedad. A través del tiempo se demuestra que los seres humanos tienen un interés por mejorar su calidad de vida y esto lleva a optar por diferentes tipos de recursos para satisfacer sus necesidades elementales. La energía de biomasa actualmente es uno de esos recursos importantes que la humanidad está desarrollando para beneficios propios. ¿Cómo podemos desarrollar este tipo de tecnología?

Durante nuestros días, hemos observado el resurgimiento de las energías renovables: eólica, hidráulica, solar, biomasa y otras que comienzan a recobrar toda la importancia que merecen. Los biodigestores están en una opción valuable para el tratamiento de desechos orgánicos ya que permiten disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y generar un gas combustible denominado biogás. Éste puede tener diferentes usos o aplicaciones, y es de esta manera que como escuelas decidimos trabajar en forma concreta en la construcción de un biodigestor con el fin de verificar y analizar experimentalmente el comportamiento del gas que se origina por descomposición de materia orgánica para futura aplicabilidad en la generación de electricidad.

2. Producción de biogás

Realmente hablar sobre la producción de gas es un estudio muy interesante porque conlleva a conocer muchos aspectos químicos sobre la descomposición de la materia orgánica debido a la acción de las bacterias en ausencia de oxígeno. Al final se resume en que dicha descomposición se lleva a cabo debido a la acción de cuatro tipos de bacterias, en ausencia de oxígeno, ellas son:

- a. Las hidrolíticas: Que producen ácido acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonatos.
- b. Las acetogénicas: Productoras de hidrógeno
- c. Las homoacetogénicas: Que pueden convertir una cantidad considerable de compuestos multicarbonados en ácido acético.
- d. Las metanogénicas: Productoras del gas metano, principal componente del biogás, con una proporción de 40 a 70% de metano (CH₄), de 30 a 60% de Dióxido de carbono (CO₂) de 0 a 1% de hidrógeno (H₂) y de 0 a 3% de gas sulfhídrico (H₂S).

Ahora bien, existen diferentes formas de poder captar ese biogás que se origina por esta descomposición de la materia orgánica, y esta captación implica uso de recipientes o tanques cerrados. Estos tanques o recipientes cerrados son los tan famosos biodigestores que generalmente son contruidos con diversos materiales como ladrillo, cemento o plástico.

1. El autor es Ingeniero Electricista, Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería, Universidad Don Bosco.

Otro aspecto importante también a tener en cuenta es la actividad metabólica desarrollada en el proceso de descomposición microbiológica y la producción de biogás ya que ésta depende de diferentes factores, tales como:

- Temperatura del sustrato;
- Nutrientes disponibles;
- Tiempo de retención (flujo a través del tiempo);
- pH;
- relación C/N;
- Contenido de sustrato sólido y agitación;
- Factores inhibidores;
- Características y producción de biogás;
- Aplicaciones del biogás;
- Fuentes de obtención de materia prima.

Dentro de estos factores la temperatura juega un papel también muy importante, ya que el nivel de producción bacteriológica de metano se incrementa con ella, y la temperatura de fermentación/digestor es de interés primario en conexión con el tiempo requerido para la completa fermentación. Por ejemplo para el tiempo de retención: mientras más alta la temperatura, más corto el tiempo de retención. Y ésta no tiene efecto en absoluto en la generación de biogás, la cual es una constante que depende sólo del tipo de biomasa en el digestor.² En la gráfica siguiente se muestra la influencia de la temperatura sobre la producción de biogás (curvas -f T, RT). Fuente: Carrillo L. 2003.

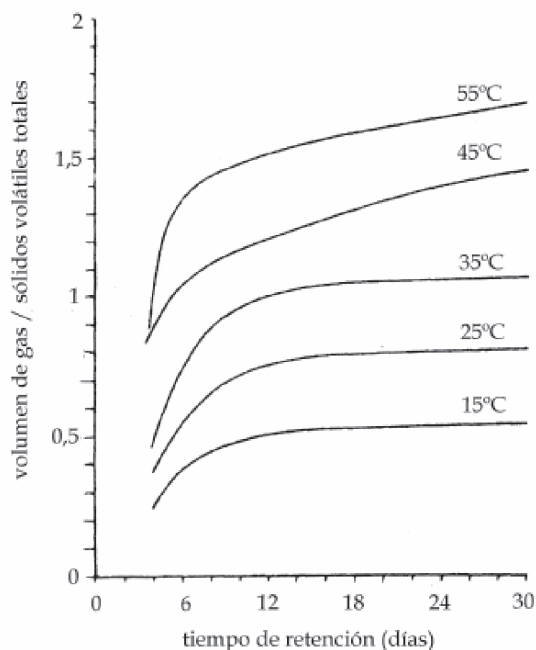


Figura 1. Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás.

Entre los residuos agrícolas y materiales de desecho que pueden ser usados como sustrato para plantas de biogás están:

- Desecho de la cría de animales: estiércol, orina;
- Desechos vegetales: grama, residuos de jardinería, etc. (aunque estos materiales no fermentan bien por sí solos);
- Desechos de hogares: basura, agua de letrinas, etc.

3. Recolección de insumos

Para la obtención de materia prima se eligieron 3 lugares: Rastro municipal de Mejicanos, Rastro municipal de Soyapango, Avícola Salvadoreña. Las características tomadas en cuenta para la selección de un lugar de obtención fueron:

- Colaboración de las autoridades del lugar para donar las excretas
- Tipos de excretas (e.g., vaca, cerdo, pollo)
- Calidad de las excretas (e.g., ST, SV)
- Localización geográfica con respecto a la UDB

En cada uno de esos lugares se obtuvieron unas muestras y se hizo un análisis de las excretas. Su calidad se midió a partir de la cantidad de sólidos volátiles encontrados en las muestras tomadas. Se tomaron muestras en los tres lugares visitados. Se midió el peso de cada muestra fresca con una balanza de la marca Carrington para uso de cocina. Luego de identificarlas fueron puestas a secar al sol durante 3 días. Después de tres días el contenido de agua en las excretas se evaporó, esto fue constatado con la obtención de un valor constante de peso en las mediciones al tercer día. Una vez pasado este tiempo se expusieron las excretas a alta temperatura por medio de brasas, para eliminar el contenido de sólidos volátiles en el material sólido.

La exposición de las excretas a las brasas duró hasta que en los recipientes ya sólo quedara ceniza. El tiempo aproximado del proceso de quemado fue de 45 minutos. Con el peso de la muestra ya quemada se obtuvo el valor de ST y SV a partir de las fórmulas:

2. U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, Pág. 153.

$$\%ST = \frac{\text{masa_del_sustrato_seco(sin_quemarlo)}}{\text{masa_del_sustrato_fresco} + \text{masa_de_agua_a_agregar}} \times 100\%$$

$$\%SV = \frac{\text{masa_del_sustrato_seco} - \text{masa_del_sustrato_despues_de_quemado}}{\text{masa_del_sustrato_fresco}} \times 100\%$$

El %SV puede ser trabajado con respecto a la masa de sustrato seco en el denominador o con respecto a la masa del sustrato fresco. En el caso de nuestra investigación se

trabajó con ambas opciones: a la masa seca por lo que se obtuvieron unidades de (gr. SV/ gr. ST) y a la masa de las excretas frescas, que conllevó a los siguientes resultados.

Tabla 1. Resultados de análisis de excretas de vaca, Soyapango

%ST en muestra con proporción agua-excretas de 2:1	
Estado	Masa de la Muestra (gr.)
Fresca	179
Seca	111
Quemada	21,82
SV(gr. SV/ gr. sustrato)	0.498
SV(gr.SV/gr.ST)	0.803
% ST	20,67%

Tabla 2. Resultados de análisis de excretas de cerdo, Mejicanos.

% ST en muestra con proporción de agua-excretas de 2:1	
Estado	Masa de la Muestra (gr.)
Fresca	55,7
Seca	19,3
Quemada	2,63
SV(gr. SV/gr. sustrato)	0,299
SV(gr.SV/gr.ST)	0.849
%ST	11,55%

Tabla 3. Resultados de análisis de excretas de pollo (pollinaza), AVÍCOLA SALVADOREÑA.

% ST en muestra con proporción de agua-excretas de 2:1	
Estado	Masa de la Muestra (gr.)
Fresca	26
Seca	26
Quemada	4,5
SV(gr. SV/ gr. sustrato)	0,823
SV(gr. SV/ gr. ST)	0.823
% ST	33,33%

4. Diseño del biodigestor³

El diseño se realizó con las siguientes fases:

a) Determinación de carga volumétrica de sustrato al digestor, Tiempo de retención, Volumen del digestor, generación de biogás (proyección), volumen de gasómetro;

b) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la cámara de digestión (estructura 1);

c) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la base que soportará el digestor (estructura 2);

d) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la base que soportará la pileta de carga (estructura 3);

Para la determinación de carga volumétrica de sustrato al digestor, Tiempo de retención se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4. Resumen de parámetros de los sustratos a utilizar.

Lugar	Tipo Excretas	Carga volumétrica V_c (kg/día)		Carga digestor C_d (Kg SV/m ³ día)	Sólidos Totales ST (%)
		Agua	Excretas		
Rastro Mejicanos	Vaca	37.64	38.8		
	Cerdo	9.79	69.43		
Rastro Soyapango	Vaca	–	72.91		
Avícola Salvadoreña	Pollinaza	61.97	12.03		

El dimensionamiento de la planta de biogás depende de la cantidad, calidad y tipo de biomasa disponible, así como también de la temperatura de digestión.

a) La temperatura promedio de 31°C es el valor promedio al que se mantiene un sustrato en proceso de digestión

b) Tiempo de retención elegido = 24 días (31°C y $f_{T,RT}=1$)

c) Adición de sustrato = Biomasa (volumen) + agua (volumen) = 72.91 lt

d) Contenido total de sólidos del digestor de 10%

El volumen del digestor se calcula por medio de la fórmula:

$$V_d = \text{Adición de sustrato} \times \text{TR (días)} \\ = 72.91 \times 24 = 1749.84 \text{ lt o } 1.75 \text{ m}^3$$

En el proyecto ese valor (1.75m³) es el elegido para el volumen de sustrato que equivale aproximadamente al 70% del volumen de la cámara de digestión, el volumen de la cámara de digestión se eligió de 2.5 m³. El cálculo anterior afirma la validez de asumir un volumen digerido del 70% del volumen total del digestor.

La cantidad de biogás generado cada día (G, m³ gas/día), se calcula tomando como base G_e (Generación específica) del sustrato y la adición diaria de este (S_d).

La generación diaria (G) se calcula mediante la ecuación:

$$G = C_d \times G_e \text{ (específico de cada sustrato)}$$

Para cada sustrato a evaluar se obtuvieron los siguientes resultados:

Rastro de Mejicanos

Vaca

$$G = (1.59 \text{ kg.SV/m}^3\text{x día}) \times 250 \text{ lt.gas/kg SV} = 397.5 \text{ lt gas /día}$$

Cerdo

$$G = (0.96 \text{ kg.SV/m}^3\text{x día}) \times 450 \text{ lt. gas /kg SV} = <432 \text{ lt gas /día}$$

Rastro de Soyapango

Vaca

$$G = (0.32 \text{ kg.SV/m}^3\text{x día}) \times 250 \text{ lt. gas/ kg SV} = 80 \text{ lt gas/día}$$

Avícola Salvadoreña

Pollinaza

$$G = (1.31 \text{ kg.SV/m}^3\text{x día}) \times 460 \text{ lt. gas /kg SV} = 602.6 \text{ lt gas /día}$$

3. Los resultados del diseño del biodigestor presentado en este artículo han sido obtenidos de la tesis "Diseño y construcción de un biodigestor para fines experimentales y didácticos como parte del estudio de investigación en energías renovables en la Universidad Don Bosco". Tesis desarrollada por Jorge Bernardo Garza Vásquez, Eduardo Ernesto Pérez y Roberto Ladislao Bonilla con apoyo de las escuelas de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Siendo los resultados experimentales obtenidos los siguientes (ver Tabla 5).

Tabla 5. Generación diaria de biogás (proyecciones).

Lugar	Tipo excretas	Generación diaria (lt/día)
Rastro Mejicanos	Vaca	397.5
	Cerdo	432
Rastro Soyapango	Vaca	80
Avícola Salvadoreña	pollinaza	602.6

La producción específica de biogás (P^e) fue calculada de acuerdo a la expresión:

$$P^e = G^e \text{ (generación específica) } / V_d \text{ (volumen del digestor)}$$

Para los sustratos a evaluar se obtuvieron los siguientes resultados:

Rastro de Mejicanos

Vaca

$$P^e = (397.5 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt} = 0.159 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Cerdo

$$P^e = (432 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt} = 0.172 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Rastro de Soyapango

Vaca

$$P^e = (80 \text{ lt gas/día}) / 2500 \text{ lt} = 0.032 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Avícola salvadoreña

Pollinaza

$$P^e = (602.6 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt.} = 0.241 \text{ lt gas/lt digestor x día.}$$

Tabla 6. Producción específica de biogás (proyecciones).

Lugar	Tipo excretas	Producción específica (lt gas/lt digestor x día)
Rastro Mejicanos	Vaca	0.159
	Cerdo	0.172
Rastro Soyapango	Vaca	0.032
Avícola Salvadoreña	pollinaza	0.241

Fuente: recursos propios.

Se observa que el gas generado en el biodigestor puede ser utilizado para las siguientes aplicaciones.

Tabla 7. Consumo de biogás para uso en cocina.

Cocina	Fríjol 1 lb.	Arroz 1 lb.	Maíz 1 lb.	Tortillas 1 lb.	Carne (caldo) 1 lb.	Café 1 lt.	4 huevos fritos	3 comidas/ 5 personas
Consumo (litros de biogás)	500	175	269	300	400	125	30	30

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100.

Tabla 8. Consumo de biogás para uso en diferente maquinaria.

Equipo	Quemador estufa 8cm.	Quemador estrella comal	Lámpara camisa 25 watt	Motor gasol. 3hp	Motor diesel 7hp 50/50	Refrigerador 8ft ³	Generador por kw
Consumo (litros de biogás/hr.)	500	175	269	300	400	125	12530

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100.

Tabla 9. Energía producida por biogás, obtenido de distintos desechos animales.

Desecho(1)	Dilución (2)	Rendimiento (3)	Energía (4)
Bovino (300kg)	1:1	0.025	133.37
Porcino (100 kg)	1:1	0.05	266.75
Aviar (2kg)	1:2	0.06	320.10
Humano (70kg)	1:1	0.04	213.4

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100.

- (1) Se indica peso de cada animal.
 (2) Dilución desecho fresco/agua.
 (3) m³ biogás/kg estiércol fresco.
 (4) kcal /kg estiércol fresco.

Dimensionamiento del gasómetro

El volumen del gasómetro (V_g), depende de las tasas relativas de generación y consumo de biogás. El gasómetro debe estar dimensionado para:

- a) Cubrir la tasa pico de consumo de biogás (V_{g1})
 b) Almacenar el gas producido durante los periodos más largos de no consumo (V_{g2}).

Las anteriores se definen así:

$$V_{g1} = g_{c, \max} \times t_{c, \max} = v_{c, \max}$$

$$V_{g2} = G \times t_{z, \max}$$

Donde: $g_{c, \max}$ = consume máximo de gas por hora (lt/hr)

- $t_{c, \max}$ = tiempo de consumo máximo (h)
 $v_{c, \max}$ = consumo máximo de biogás
 G = producción de gas (lt/hr)
 $t_{z, \max}$ = tiempo máximo de cero consumo (h)

El mayor valor de V_g (V_{g1} o V_{g2}) determina el volumen del gasómetro. Un margen de seguridad de 10-20%

deberá ser añadido. De acuerdo a la investigación realizada, experiencia práctica muestra que normalmente debe ser almacenado entre 40-60% de la producción diaria de gas. La razón volumen de digestor al volumen del gasómetro (V_d / V_g) es un factor principal con relación al diseño básico de la planta de biogás. Para una planta típica de biogás agrícola, esta razón está entre los valores de 3/1 y 10/1, dándose frecuentemente los valores de 5/1 y 6/1.⁴

a). Para el consumo pico de biogás. Asumiendo que se consuman 600 lt/hr (pollinaza) durante 2 hr, se tiene:

$$V_{g1} = 600 \times 2 = 1200 \text{ lt o } 1.2 \text{ m}^3$$

b). Con un tiempo de almacenamiento de 3 días, y una producción diaria de gas de 432 lt/diarios (excretas de cerdo, Rastro Mejicanos)

$$V_{g2} = 600 \times 3 \text{ días} = 1800 \text{ lt o } 1.8 \text{ m}^3$$

Asumiendo un factor de seguridad del 50% y tomando el valor obtenido en el literal "b" anterior se obtiene el volumen del gasómetro plástico:

$$V_g = 1.5 \times 1.8 = 2.7 \text{ m}^3$$

volumen del gasómetro plástico

Esfuerzos de la cámara de digestión (estructura 1)

Calculando la presión a la cual están sometidas las paredes del cilindro de barriles, el punto más crítico se ubicó en la cara del fondo de la fila de barriles.

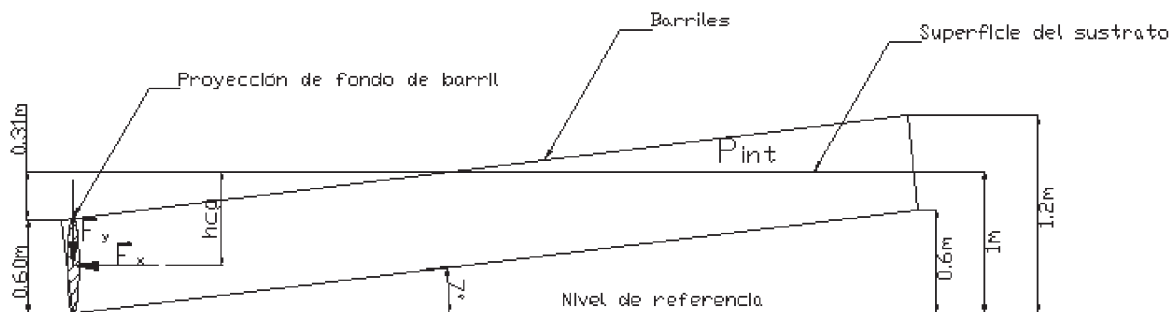


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre, Cámara de digestión.

4. U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, Pág. 153.

Datos:

$$P_{\text{int}} = 20 \text{ psi o } 136 \text{ kPa}$$

$\gamma_{\text{sustrato}} = 21.56 \text{ kN/m}^3$ Densidad de excretas de cerdo obtenido de mediciones, sin contenido de agua.

Los cálculos sobre los parámetros de fuerza fueron:

$$F_y = 11.78 \text{ kN o } 2648 \text{ lbf}$$

$$F_x = 43.8 \text{ kN o } 9839 \text{ lbf}$$

La resultante sobre la pared inferior del barril es:

$R = 45.35 \text{ kN o } 10189 \text{ lbf}$ a un ángulo de 15.06° con respecto a la horizontal

Por simplicidad se asumió que la resultante actúa en el centro de gravedad de la pared del barril. Para evitar que la pared del fondo se vuelva cóncava con la presión, se añadió lámina de 1/8" sobre toda la pared.

El esfuerzo longitudinal en la pared cilíndrica del barril es:

$$\sigma_n = 9.71 \text{ MPa o } 1409 \text{ psi}$$

El esfuerzo tangencial en las paredes del barril está definido por:

$$\sigma_t = 4.85 \text{ MPa o } 704 \text{ psi}$$

La selección del barril se hace en base a que este soporte una presión hidrostática mayor a 138kPa (20 psi), un grosor de pared igual o mayor a 1.4 mm... y que esté diseñado para trabajar con líquidos con una densidad relativa mayor a 2.

Por lo que la denominación del barril a utilizar es:

UN IA2 /Y2.2/230/00/USA/M1234/1.4/1/1.4

Donde:

UN: Naciones Unidas

I: Barril metálico

A: acero

2: destapado

Y: Grupo de empaque (grupos I y II peligro alto y medio, grupo III material de poca toxicidad)

2.2: densidad relativa del líquido de almacenaje

230: presión hidrostática máxima en kPa (34 psi)

00: año de fabricación (ejemplo)

USA: país de fabricación (ejemplo)

M1234: Fabricante

1.4/1.0/1.4: espesores de tapadera, cuerpo y fondo en mm.

El factor de seguridad de selección del barril se calcula en base a la relación entre la presión de diseño y la presión de trabajo:

$$n = \frac{230}{138} = 1.7$$

El espaciamiento entre la unión de dos barriles describe un espacio triangular de la siguiente manera:

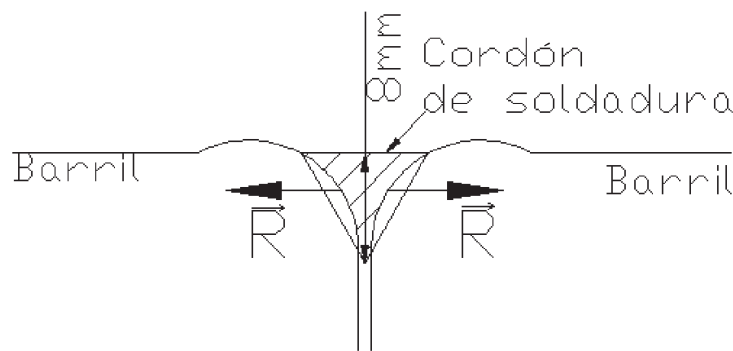


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de sección de soldadura de barril.

El esfuerzo al que está sometido un cordón es:

$\sigma = 10.02 \text{ MPa o } 1454 \text{ psi}$ Esfuerzo normal en un cordón de soldadura

La cantidad de electrodos a utilizar para la soldadura de los barriles es (considerando que 1 electrodo rinde 3" de cordón de soldadura):

Del valor de esfuerzo anterior se selecciona el electrodo E-6013 $\emptyset 3/32"$ para la realización del cordón.

Electrodos = 300 electrodos E-6013 $\emptyset 3/32"$

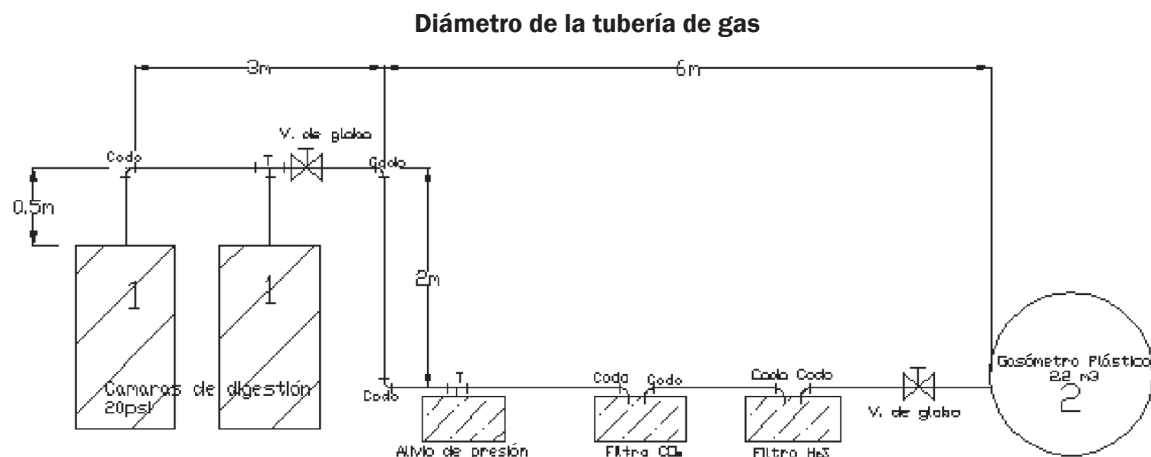


Figura 4. Diagrama de tubería de biogás.

Según la figura 4 correspondiente el número de elementos entre el digestor y el gasómetro son: 2T, 7 codos a 90°, 2 válvulas de globo. Todos los elementos y la tubería fueron de PVC para evitar la corrosión provocada por el ácido sulfhídrico (H_2S) contenido en el biogás. El diámetro de la tubería fue de 3.81cm (1.5").

Agitador

Para optimizar el proceso de digestión se utilizó un tornillo de Arquímedes (tornillo sin fin) como medio de agitación y de transporte para el sustrato. Su principio de funcionamiento se explica en la Figura 5.

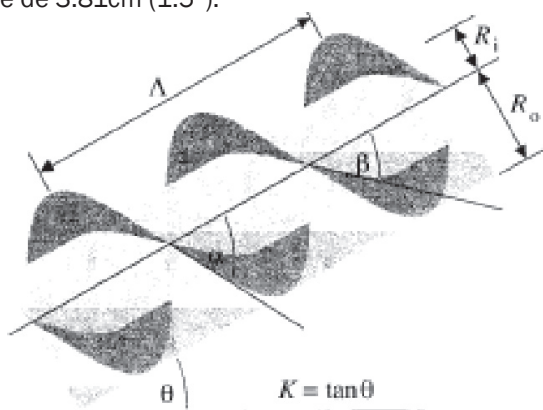


Figura 5. Vista de perfil de un tornillo de Arquímedes de dos hélices. Fuente: Rorres C. 2000.

La figura 5 muestra cómo las cubetas (volumen transportado por cada hélice) son formadas entre pares adyacentes de hélices. Las cubetas se mueven hacia arriba del tornillo en la medida que éste es rotado en sentido horario visto desde el reservorio superior. Los bordes internos y externos de cada hélice determinan dos curvas senoidales del mismo periodo. Una tiene una amplitud igual al radio interno (R_i) y la otra tiene una amplitud igual al radio externo (R_o). El ángulo que el tornillo forma con la horizontal determina la pendiente $K = \tan \theta$.⁵

Debido a limitaciones financieras el tornillo no se fabricó según nuestro diseño específico, sino que fue

adquirido en una chatarrera cercana al campus de la UDB. Los parámetros que determinan la geometría del tornillo a nuestra disposición son (según Figura 5):

R_o = Radio externo del tornillo (7.25 cm o 2.75 ")

L = longitud total del tornillo (3.5 m)

K = pendiente del tornillo (12% o 7°)

R_i = radio interno del eje del tornillo (2.12 cm o 7/8")

Λ = paso de un tornillo (20 cm o 7.87")

N = número de hélices (1)

β = ángulo formado entre la curva sinusoidal definida por el borde interno de la hélice y el eje del tornillo (35°).

5. Rorres C., THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Enero 2000, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 1.

Volumen de una cubeta⁶

El volumen óptimo (m³) transportado por una cubeta está definido por:

$$V_T = \left(\frac{2\pi^2 R_o^3}{K} \right) \lambda u(N, \rho, \lambda)$$

donde: λ : Relación de paso ($0 < \lambda < 1$), número adimensional

u : Relación de volumen, adimensional

ρ : Relación de radios ($0 < \rho < 1$)

Los valores de los parámetros anteriores se resumen en la Tabla 10, a continuación:

Tabla 10. Parámetros adimensionales óptimos para tornillos de Arquímedes de varios números de hélices.

Número de hélices	Relación de Radios óptima	Relación de paso óptima	Volumen óptimo por vuelta	Relación óptima de volúmenes
N	ρ	λ	$\lambda u(N, \rho, \lambda)$	$u(N, \rho, \lambda)$
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601
10	0.5356	0.3092	0.0802	0.2592
11	0.5358	0.3145	0.0813	0.2586
12	0.5360	0.3193	0.0824	0.2580
13	0.5360	0.3234	0.0833	0.2574
14	0.5360	0.3270	0.0841	0.2571
15	0.5364	0.3303	0.0848	0.2567
16	0.5362	0.3333	0.0854	0.2562
17	0.5362	0.3364	0.0860	0.2556
18	0.5368	0.3380	0.0865	0.2559
19	0.5364	0.3404	0.0870	0.2555
20	0.5365	0.3426	0.0874	0.2551
21	0.5370	0.3440	0.0878	0.2553
22	0.5365	0.3465	0.0882	0.2544
23	0.5369	0.3481	0.0885	0.2543
24	0.5367	0.3500	0.0888	0.2538
25	0.5371	0.3507	0.0891	0.2542
.....
α	0.5394	0.3953	0.0977	0.2471

Fuente: Rorres C. 2000.

6. Fórmula obtenidas de: Rorres C. THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Enero 2000, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 1.

Calculando el volumen óptimo transportado por el tornillo a instalar en la cámara de digestión con los valores de la Tabla 11 para un tornillo de 1 hélice y las dimensiones descritas anteriormente, se tiene:

$$V_T = 0.0678 \times 0.0361$$

$$V_T = 2.44 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ o } 2.44 \text{ lt/ciclo}$$

El volumen total (VT) transportado, sucede en un ciclo del tornillo. Un ciclo es un segmento de longitud igual al paso del tornillo (20cm). En toda la longitud del tornillo se transportan (17 ciclos):

$$V_{\text{transportado}} = 17 \text{ ciclos} \times 2.44 \text{ lt/ciclo} = 42 \text{ lt}$$

En resumen se establecieron los siguientes requerimientos para la implementación del digestor:

Tabla 11. Resumen de elementos de diseño seleccionados para el digestor.

ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD
Cámara de digestión	Barril UN IA2 /Y2.2/230/00/USA/M1234/1.4/1/1.4	20
Agitador	Tornillo Sinfin	2
	Motor 0.5 HP monofásico	2
	Balero ET-323/32C	4
	Chumacera UCP206-104D1	4
	Prensa estopa	4
	Trenza grafitada 1/4"	2 lb
	Perno 1/4"	48
Estructura	Ángulo 2 x 2 x 1/8"	22
	Platina 2" x 1/8"	4
	Barilla Ø1/2"	4
	Electrodo E6013 3/32"	30 lb
Pileta de carga	Tanque 750 litros	1
	Válvula de bola 3"	4
	Tubo galvanizado 3"	5 m
	Tubo PVC 1 1/2"	20 m
	Válvula de bola 1 1/2"	3
Gasómetro	Tubo de neumático 29.5 x 25 "	1

5. Implementación del Biodigestor

Para iniciar el proyecto fue necesario reconocer las áreas disponibles para la construcción del mismo. De los cuales se tomaron en cuenta criterios ambientales para su selección. Se evaluaron tres que son:



Figura 6. Terreno contiguo al edificio de laboratorios de Mecánica de la UDB (opción 1). La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006



Figura 7. Terreno contiguo a edificio de Órtesis y prótesis (opción 2). La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006



Figura 8. Terreno fuera del campus UDB, contiguo a muro del CITT. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

El área necesaria para la construcción fue estimada en de 2.5 m x 9m. Los parámetros principales que debe reunir dicho lugar son:

1. Recibir la luz del sol durante el día (ausencia de árboles que proporcionen sombra). La absorción de energía solar en las cámaras de digestión aumenta la temperatura del sustrato y disminuye el tiempo de retención hidráulico (tiempo de fermentación).
2. No debe interferir con la expansión del campus de la UDB.
3. Debe estar a una distancia de al menos 10 m de cualquier asentamiento humano, ya que durante la carga se manipulan excretas causando malos olores y atrayendo moscas.⁷
4. Disponibilidad de servicios de agua y electricidad para realizar trabajos en el biodigestor.

5. Seguridad para todos los elementos y componentes del digestor.

De acuerdo a los criterios de investigación, el lugar con la menor puntuación causará el menor impacto. De tal forma que se seleccionó la opción 2 con un puntaje total de 338 puntos.

Descripción del sistema de Biodigestor

El sistema del Biodigestor está conformado por tres subsistemas (ver Figura 9).

1. Sistema de carga de materia prima
2. Cámara de Digestión
3. Sistema de transporte y almacenamiento de biogás



Figura 9. Subsistemas del biodigestor. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

7. Better Farming Series 31 - Biogas: What it is; How it is made; How to use it (FAO, 1984, pág. 52).

Sistema de carga de materia prima

Su función es proporcionar el espacio para realizar la mezcla de la excretas con agua, para luego dejarla fluir por las tuberías de 3" de diámetro hasta las cámaras de digestión. Este sistema lo conforman (ver Figura 10):

1. Tanque de 450 lt (número 1, figura 9)
2. Tubo de hierro negro de 3"
3. Junta universal de PVC de 3"
4. Niple todo rosca de 3"
5. Válvula de Bola de PVC de 3"

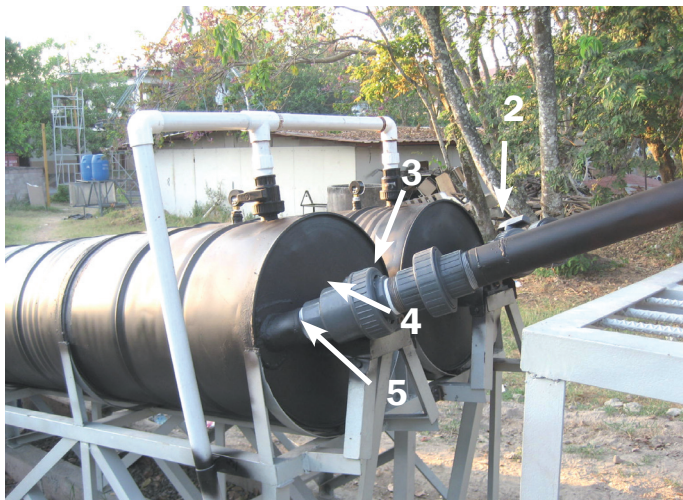


Figura 10. Sistema de Carga. Fuente: recursos propios. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Cámara de digestión

Su función es mantener bajo condiciones anaeróbicas al sustrato. Cuenta con un sistema de agitación que remueve el sustrato en toda la longitud del digestor. La cámara de digestión posee una válvula de descarga de sustrato en el nivel de cota cero, para extraer por gravedad el sustrato después de pasado el tiempo de retención elegido. El ángulo de inclinación que poseen ambas cámaras es de 7°. Los elementos que la componen son (ver Figura 11):

1. Cilindro de barriles inclinado a 7°
2. Agitador
3. Compuerta de mantenimiento
4. Válvula de descarga
5. Tubería de carga
6. Manómetros
7. Válvulas de salida de biogás



Figuras 11. Dos vistas de las cámaras de digestión. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Agitador

Remueve el sustrato en toda la longitud de la cámara de digestión, proporcionando un proceso de digestión más uniforme y disminuyendo el tiempo de retención hidráulico elegido. El sistema funciona por medio de una manivela que hace girar un eje. El sustrato se mantiene dentro de la cámara por medio un prensa estopas que posee empaque grafitado.

Los ejes que pasan a través de las cámaras de digestión son como muestra la Figura 12. Poseen un aspa fabricada de ángulo de 2"x2"x1/8" cada 0.9 m, que es equivalente a poseer un aspa por barril. En los primero 3 barriles el eje tiene un tornillo sin fin que agitará todo el sustrato sedimentado.



Figura 12. Eje agitador, visto desde la compuerta de mantenimiento. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

El sello hidráulico entre el eje y la cámara de digestión se logra por medio de un prensa estopa que consta de dos piezas fabricadas de acero 6018. La pieza hembra

aloja las trenzas grafitadas de 1/4" como lo muestra las ilustraciones 32, 33, 34, esta pieza está soldada a las paredes de la cámara de digestión.

Trenza 1/4"



Figura 13. Prensa estopa hembra. Fuente: recursos propios. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Posee el espacio necesario para alojar las trenzas grafitadas y permitir que el prensa estopas macho ejerza presión formando un sello hermético.



Figura 14. Prensa estopa macho. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

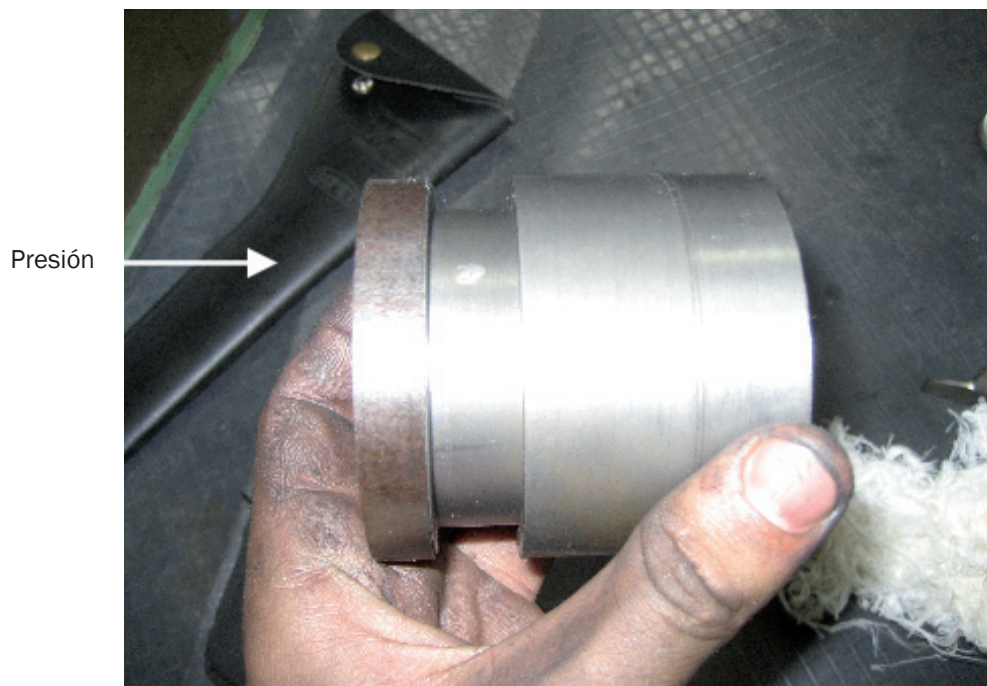


Figura 15. Conjunto de prensa estopa. Fuente: recursos propios. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

La compresión realizada por la pieza macho deforma las trenzas sellando la cámara de digestión. La compresión se logra con tres pernos de 1"x 3/8" no mostrados en la figura 15.

Sistema de transporte y almacenamiento de biogás

Transporta el gas por medio de una tubería de PVC de 1 1/2" de diámetro hacia un gasómetro plástico. Este sistema posee válvulas para cerrar el paso de gas

desde cada cámara de digestión. También posee Filtros para purificación de gases no deseados en el biogás CO_2 y H_2S . El sistema lo componen los elementos mostrados en la figura 16:

1. Válvulas de bola 1 1/2" PVC
2. Manómetros de 0-30psi
3. Alivio de presión
4. Filtro de CO_2
5. Filtro de H_2S
6. Válvulas para muestras de gas
7. Gasómetro plástico

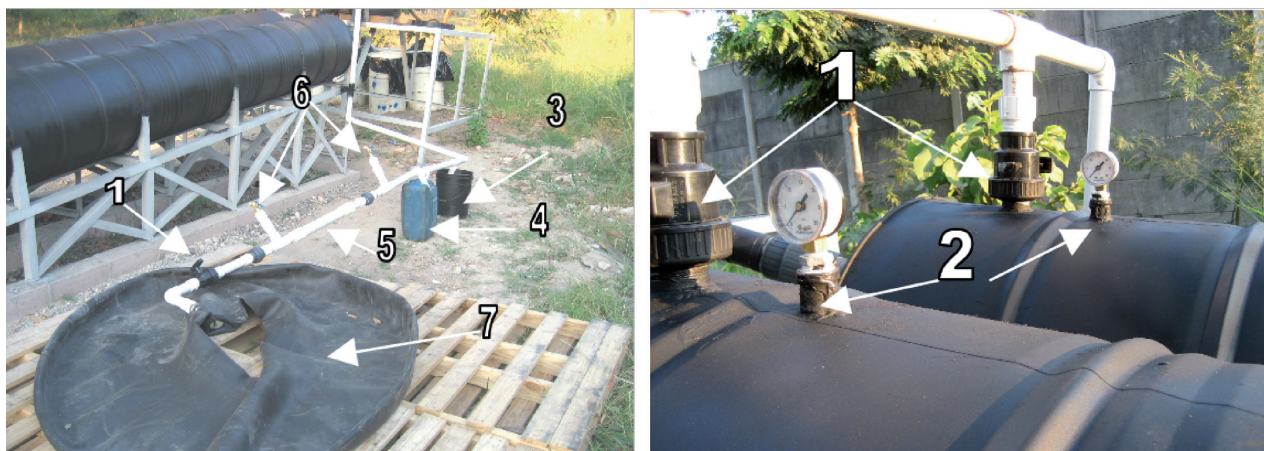


Figura 16. Componentes del sistema de transporte y almacenamiento de biogás. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Procedimiento para la carga inicial de sustrato

El digestor posee dos cámaras de digestión. Al cargar el digestor por primera vez se debe esperar un tiempo de 24 días hasta que se alcance el máximo de generación de biogás. La mezcla de excretas y agua se realiza en el tanque de 450 lt. Se agrega la cantidad de excretas calculada y luego se agrega agua (relación agua: excretas, 2:1 excretas de vaca y cerdo, 6:1 excretas de pollo).

Procedimiento:

- 1- Cerrar las válvulas 1 según la Figura 16.
- 2- Colocar el volumen de excretas en el tanque de 450 lt según cálculos realizados
- 3- Se agrega un volumen de agua según la relación excretas: agua
- 4- Se realiza una agitación suave para homogeneizar la mezcla

5- Las válvulas 2 deben estar abiertas para que el influente desplace el aire al interior de las cámaras de digestión o cámara que será cargada. Las válvulas 3 deben estar cerradas para evitar que las cámaras se vacíen al mismo tiempo que son cargadas.

6- Según que cámara será cargada se abre una de las válvulas 1

7- Se deja fluir el sustrato hasta que el tanque de 450lt esta vacío.

8- El volumen máximo de sustrato en cada cámara es de 0.87 m^3 , lo que equivale a llenar dos veces el tanque 450 lt por cámara. El nivel de líquido dentro de las cámaras debe de ser de aproximadamente 1.22 m sobre el piso de cemento, inundando así la tubería de carga y evitando fuga de gas o entrada de oxígeno.

9- Realizar los pasos 1 a 8 para cargar cada una de las cámaras de digestión.

10- Las válvulas 1 y 3 deben permanecer cerradas todo el tiempo. Las válvulas 2 permiten el paso del biogás al

gasómetro. De mantener cerradas las válvulas 2 todo el tiempo la presión de las cámaras aumentara, la presión máxima no debe sobrepasar 20 psi.

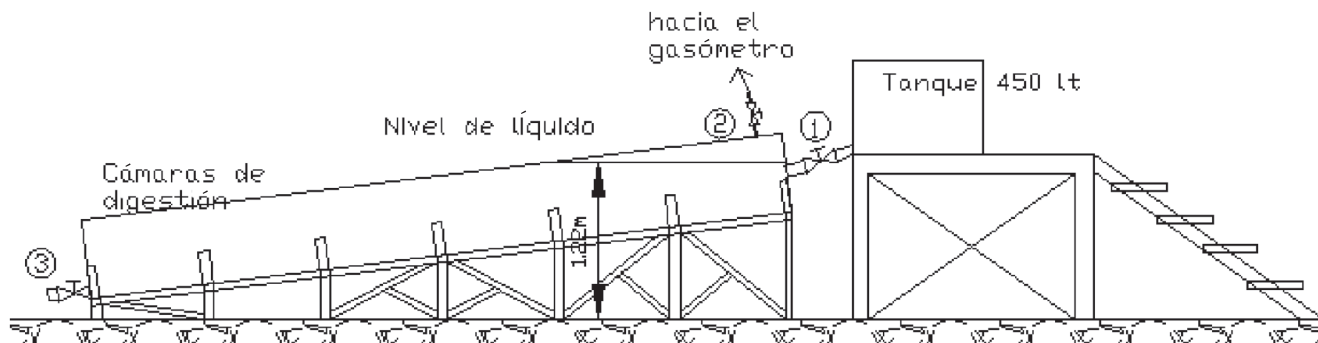


Figura 17. Procedimiento para carga de sustrato en el biodigestor. Fuente: recursos propios. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Procedimiento para carga diaria de sustrato

Luego de pasados 24 días de la primera carga, la generación de biogás alcanzará su valor máximo. Para mantener el nivel de generación se realizarán cargas diarias de sustrato dando alimento nuevo a las bacterias metanogénicas. Los valores calculados de carga diaria se encuentran especificados en la Tabla 20 capítulo 3. (Ver Figura 17 en procedimiento anterior).

Procedimiento:

- 1- Las válvulas 1 deben estar cerradas
- 2- Hacer la mezcla de agua: excretas en el tanque de 450 lt según el sustrato a utilizar y usando valores de tabla 20 Cap.3.
- 3- Las válvulas 2 deben abrirse para reducir la presión de las cámaras de digestión o cámara a cargar, permitiendo así la entrada del sustrato nuevo.
- 4- Una vez realizada la mezcla en el tanque de 450 lt, abrir la válvula 1 de la cámara correspondiente.
- 5- La válvula 3 deberá permanecer cerrada
- 6- Una vez realizada la carga se deberá retirar una cantidad igual en volumen de sustrato digerido de la válvula 3 correspondiente a la cámara cargada.

7- Al retirar un volumen igual al agregado tener cuidado de no extraer demasiado sustrato o la tubería de carga no quedará sumergida y habrá fuga de gas o ingreso de oxígeno.

Procedimiento para agitación de sustrato

El agitador del digestor recorre toda la longitud de cada cámara de digestión. Cuenta en el lado de la descarga con un tornillo sin fin de 2.2 m de largo. En toda su longitud posee aspas fabricadas de ángulo de 2x2x1/8" y 12 cm de alto, ubicadas cada 90 cm. orientadas para impulsar el sustrato en dirección de la tubería de carga (ver Figura 18).

Procedimiento:

- 1- Colocar la manivela en el eje del agitador de la cámara a agitar
- 2- Girar en sentido antihorario por 4 a 5 minutos suavemente (no se puede especificar una velocidad de agitación, ya que no existe en la actualidad estudios del efecto de agitación sobre la generación de biogás)
- 3- La agitación debe ser una vez al día, un exceso de agitación inhibirá el proceso resultando en un mayor tiempo de retención o disminuyendo la calidad del biogás (concentración de metano).



Figura 18. Sentido de giro del agitador. Fuente: recursos propios. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Filtros de CO₂ y H₂S

El principio de funcionamiento de cada filtro fue establecido en el apartado 2.9.1. Con una generación diaria de 600 lt (tabla 21 Cáp. 3) de biogás y con una composición de 6.9% CO₂:

$$\begin{aligned} \text{Volumen diario de CO}_2 &= 600 \times 0.069 = 41.4 \text{ lt/día} \\ \text{Volumen de un gas ideal} &= 22.4 \text{ lt/mol} \\ \text{Moles de CO}_2 \text{ diarios (n)} &= 41.4 / 22.4 = 1.84 \\ &\text{moles/día} \end{aligned}$$

Al multiplicar por el peso molecular (M = 56.1 gr./mol) se obtiene:

$$m = n \times M = 1.84 \times 56.1 = 103.22 \text{ gr/día de cal}$$

La masa purificadora de CaO será calculada para un periodo de 7 días, por lo que:

$$m = 723 \text{ gr. de CaO}$$

Según la evaluación realizada por Coto R. y Maldonado M.⁸ las pruebas de dilución del compuesto químico se trabaja a temperatura ambiente mostrando una buena suspensión la relación de tres partes de agua y una parte del compuesto (CaO) ya que no presenta problemas como: poca dilución, exceso de precipitado suspensión con exceso de viscosidad, etc.

De lo anterior la masa de agua a utilizar es:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 723 \times 3 = 2.16 \text{ Kg. de H}_2\text{O o aproximadamente 2.2 lt}$$

Filtro de H₂S

El filtro lo compone viruta de hierro oxidada dentro de un tubo de PVC de 3" x 44.5 cm. El filtro utilizado se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Filtro de H₂S. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

8. Procedimiento y porcentaje obtenido de: Coto R., Maldonado M., Diciembre 2005, Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en EARTH, Trabajo de Graduación, Guacimo, Costa Rica, Pág. 41.

La masa de virutas utilizada es renovada al ser expuesta al aire.



Figura 20. Vista del biodigestor construido. La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

6. Resultados obtenidos de la experimentación

El proceso de cuantificación se realiza de manera visual estimando cuánto del volumen del tubo de llanta está ocupado (1.33 m^3).

La primera carga de sustrato fue realizada el día sábado 10 de febrero de 2007. La cámara de digestión contraria al gasómetro se cargó excretas de vaca (2:1) y la derecha contigua al gasómetro, con excretas de pollo (6:1).

El tiempo calculado de retención hidráulica (TRH) fue de 24 días. Debido a que las cámaras alcanzan una temperatura mayor a la realizada en la toma de mediciones en el digestor de anexo 2, el tiempo de generación se redujo a 6 días. Se

obtuvo un volumen de aproximadamente 1.33 m^3 el día 16 de febrero de 2007, lo que equivale a 221 lt/día .

Para la comprobación del contenido de metano (CH_4) en el gas almacenado se procedió a una quema del gas en una de las válvulas de obtención de muestras. Asumiendo despreciables las pérdidas de calor con los alrededores (ver Figura 20).

El sistema utilizado para la quema del gas lo componen:

1. Mangueras
2. Medidor de flujo LPM (0-5 lpm)
3. Quemador bunsen



Figura 21. Sistema utilizado para la quema de biogás en el laboratorio (a) y en el sitio del digestor (b). La fotografía fue tomada entre mayo y noviembre de 2006

Volumen de agua = 200ml

$T_{H_2O} = 35.6^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{ambiente}} = 32.7^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{tiempo de combustión}} = 19 \text{ min.}$

$T_{\text{max}} = 82^{\circ}\text{C}$

Flujo de biogás = 2.5lpm (el coeficiente de aire primario en el quemador fue de 0).

De esto se puede calcular el poder calorífico del biogás por unidad de tiempo

como:

$$Q/t = mc\Delta T$$

Donde: Q/t : Calor por unidad de tiempo

m: masa de agua

c: poder calorífico

ΔT : cambio de temperatura

$$Q/t = 0.2\text{kg} \times 4.186 \text{ kJ/kgK} \times (82-35.6) / 1140$$

$$sg = 34.07 \text{ J/s}$$

Expresándolo por unidad de volumen:

$$(Q/t) / V = 34.07 / 0.048 = 0.71 \text{ kW/m}^3$$

El pH de los sustratos en ambas cámaras de digestión fue monitoreado a partir de la segunda semana de fermentación. La medición se realizó abriendo la válvula de descarga y sacando un pequeño volumen de sustrato. El medidor utilizado es de la marca PHYWE para medición de pH y temperatura, proporcionado por el Departamento de Medio Ambiente de la UDB. Los resultados de la medición son:

Tabla 12. Resultado de mediciones de pH en sustratos de pollo y vaca.

Fecha	16/02/07	22/02/07	28/03/07
pH Sustrato Vaca	7.52	7.35	7.14
pH Sustrato de pollo	5.91	7.08	6.74

De la Tabla 12 se observa que la fermentación anaeróbica del sustrato de pollo ha pasado de un valor levemente ácido a un valor neutro; ha pasado la etapa de acidificación. El sustrato de vaca varió levemente, este sustrato fue utilizado en el digestor de domo flotante presentado para el primer avance de este proyecto (Anexo 2); por lo que no ha experimentado una etapa de acidificación.

Conclusiones

- El análisis experimental llevado a cabo a través de la ejecución de este proyecto demuestra la capacidad para desarrollar tecnologías sobre energías renovables, y específicamente sobre el tratamiento de biomasa orgánica como fuente de potencial energético. Esto se demuestra en la combinación de los dos sustratos que se utilizaron ya que alcanzaron niveles de generación de 1.18 m³ de biogás diario lo cual estuvo dentro de los rangos calculados lo que demostró la efectividad de los sustratos.

- El biodigestor diseñado también redujo considerablemente el tiempo de retención hidráulica comparado con sistemas más sencillos mencionados en los antecedentes, que tardan un mes en generar biogás. Lo cual se comprobó con una reducción de tiempo de generación de 24 a 6 días. Ya que la temperatura tropical de nuestro país ayuda en gran manera a la aceleración del proceso de digestión para la generación de biogás.

- En la primera etapa de la fermentación anaeróbica se genera biogás con un bajo porcentaje de metano. Esta gas produce un mal olor debido al contenido de ácido sulfhídrico. La llama producida al hacer arder el metano, fue de color celeste e inodora.

- Los costos de construcción de este prototipo ascendieron a US \$2300, el gas generado anualmente según proyecciones es en promedio 425 m³ que representan 1.5 cilindros de propano de 100lb al mes equivalente a US\$50 al mes o US\$603 al año. Este aplicación del biogás puede ser utilizada en zonas rurales e inclusive en zonas urbanas.

Fuentes de Información:

1. Agencia Norteamericana de Protección Medioambiental, Invierno 2002, Managing Manure with Biogas Recovery Systems Improved Performance at Competitive Costs, The AgSTAR Program, USA.
2. GTZ, “Biogas Digest”, Volumen I, Información y servicio de asesoría en tecnología apropiada.
3. Henríquez L., J. Mantilla y M. Niño, 6 Septiembre 2006, Influencia de la temperatura interna en digestores tipo batch cargados con pollinaza, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia.
4. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Digestor para biogás, Construcción convencional, Proyecto Leña y fuentes alternas de energía, Hoja de datos técnicos, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
5. Monterrosa J., Abril 1987, La fermentación anaeróbica y los parámetros que afectan la biodigestión, Proyecto: “investigación de modelos de digestores para producción de biogás, convenio CENTA-ENA-CEL”, Santa Tecla, El Salvador.
6. Rene A., R. Víctor, 2004, Producción Anaeróbica De Biogás Aprovechamiento De Los Residuos Del Proceso Anaeróbico, Cámara Nacional De Industrias, IIDEPROQ, La Paz, Bolivia
7. Rorres C., Enero 2000, THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Boletín de ingeniería hidráulica, Vol. 126, No. 1.
8. Werner U., S. Ulrich, H. Nicolai, 1989, “Biogas plants in Animal Husbandry”, GTZ.

Cómo citar este artículo:

GUERRA, Moisés. “Diseño y construcción de un biodigestor en la Universidad Don Bosco”. Ing-novación. Revista de Ingeniería e Innovación de la Facultad de Ingeniería, Universidad Don Bosco. Agosto 2011, Año 1, No. 2. pp. 33-53. ISSN 2221-1136.